

(43) 国際公開日  
2005年2月17日 (17.02.2005)

PCT

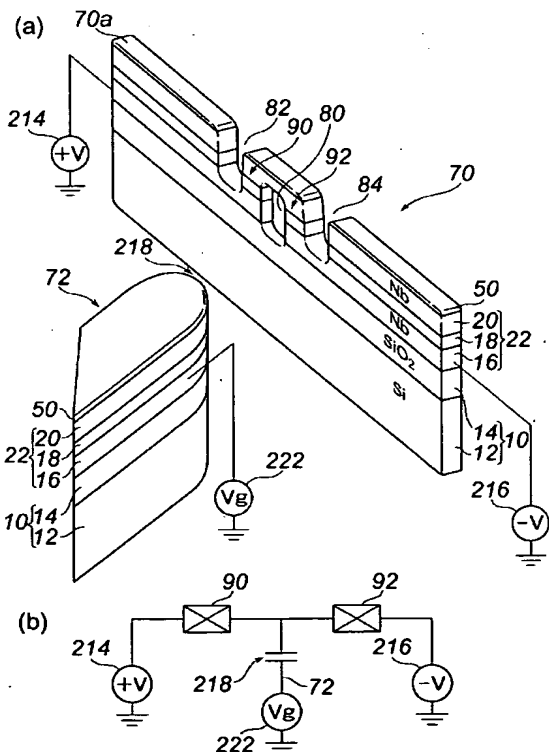
(10) 国際公開番号  
WO 2005/015650 A1

- (51) 国際特許分類: H01L 39/24, 39/22, 29/66 (72) 発明者; および  
(75) 発明者/出願人 (米国についてのみ): 渡部 道生 (WATANABE, Michio) [JP/JP]; 〒3510198 埼玉県和光市広沢2番1号 独立行政法人理化学研究所内 Saitama (JP). 中村 泰信 (NAKAMURA, Yasunobu) [JP/JP]; 〒1088001 東京都港区芝五丁目7番1号 日本電気株式会社内 Tokyo (JP).
- (21) 国際出願番号: PCT/JP2004/011071
- (22) 国際出願日: 2004年8月3日 (03.08.2004)
- (25) 国際出願の言語: 日本語
- (26) 国際公開の言語: 日本語
- (30) 優先権データ:  
特願2003-206546 2003年8月7日 (07.08.2003) JP
- (71) 出願人 (米国を除く全ての指定国について): 独立行政法人理化学研究所 (RIKEN) [JP/JP]; 〒3510198 埼玉県和光市広沢2番1号 Saitama (JP). 日本電気株式会社 (NEC CORPORATION) [JP/JP]; 〒1088001 東京都港区芝五丁目7番1号 Tokyo (JP).
- (81) 指定国 (表示のない限り、全ての種類の国内保護が可能): AE, AG, AL, AM, AT, AU, AZ, BA, BB, BG, BR, BW, BY, BZ, CA, CH, CN, CO, CR, CU, CZ, DE, DK, DM, DZ, EC, EE, EG, ES, FI, GB, GD, GE, GH, GM, HR, HU, ID, IL, IN, IS, KE, KG, KP, KR, KZ, LC, LK, LR, LS, LT, LU, LV, MA, MD, MG, MK, MN, MW, MX, MZ, NA, NI, NO, NZ, OM, PG, PH, PL, PT, RO, RU, SC, SD, SE, SG,

(続葉有)

(54) Title: METHOD OF MANUFACTURING MICRO TUNNEL-JUNCTION CIRCUIT AND MICRO TUNNEL-JUNCTION CIRCUIT

(54) 発明の名称: 微小トンネル接合回路の作製方法および微小トンネル接合回路



(57) Abstract: A method of manufacturing a micro tunnel-junction circuit capable of remarkably relieving the limitation of a circuit pattern to be manufactured and remarkably relieving the limitation of a metallic material to be used. In the method, a three-layer structure is formed by laminating a first metal, an insulator, and a second metal on a substrate in this order, a narrow wall part is formed by cutting the three-layer structure in the depth direction by using a converging ion beam, at least one laterally passed through-hole is formed in the wall part by using the converging ion beam, and at least one recessed portion positioned adjacent to the hole is formed by cutting the upper surface of the wall part in the depth direction. The hole is a through-hole starting at the position of the head of the second metal to the position of the head of the substrate, and the recessed part is formed to be recessed from the upper surface of the wall part into the first metal.

(57) 要約: 作製する回路パターンの制限を大幅に緩和することができるようにし、また、使用する金属材料の制限を大幅に緩和することができるようにするものであり、基板上に第1の金属と絶縁体と第2の金属とを順次に積層した3層構造体を形成し、集束イオンビームを用いて上記3層構造体を深さ方向に切削加工して幅の狭い壁部を形成し、集束イオンビームを用いて、上記壁部に幅方向に貫通する穴を少なくとも1つ以上穿設するとともに、上記壁部の上面を深さ方向に切削加工して上記穴に隣接して位置する凹所を少なくとも1つ以上形成し、上記穴は第2の金属に入り込んだ位置から上記基板へ入り込んだ位置へ至る貫通孔であり、上記凹所は上記壁部の上面から第1の金属に入り込むように形成されたものである。



SK, SL, SY, TJ, TM, TN, TR, TT, TZ, UA, UG, US, UZ,  
VC, VN, YU, ZA, ZM, ZW.

BJ, CF, CG, CI, CM, GA, GN, GQ, GW, ML, MR, NE, SN,  
TD, TG).

(84) 指定国 (表示のない限り、全ての種類の広域保護が可能): ARIPO (BW, GH, GM, KE, LS, MW, MZ, NA, SD, SL, SZ, TZ, UG, ZM, ZW), ユーラシア (AM, AZ, BY, KG, KZ, MD, RU, TJ, TM), ヨーロッパ (AT, BE, BG, CH, CY, CZ, DE, DK, EE, ES, FI, FR, GB, GR, HU, IE, IT, LU, MC, NL, PL, PT, RO, SE, SI, SK, TR), OAPI (BF,

添付公開書類:

— 国際調査報告書

2文字コード及び他の略語については、定期発行される各PCTガゼットの巻頭に掲載されている「コードと略語のガイダンスノート」を参照。

## 明 細 書

## 微小トンネル接合回路の作製方法および微小トンネル接合回路

## 技術分野

- [0001] 本発明は、微小トンネル接合回路の作製方法および微小トンネル接合回路に関し、さらに詳細には、単電子トランジスタなどの微小トンネル接合素子を製造する際に用いて好適な微小トンネル接合回路の作製方法および微小トンネル接合回路に関する。

## 背景技術

- [0002] 一般に、電荷測定や量子計算を実現するための電子素子として、単電子トランジスタなどのような微小トンネル接合回路を備えた電子素子が知られている。

[金属／絶縁体／金属]構造のように金属で絶縁体を挟み込んだサンドイッチ構造におけるトンネル接合のサイズを小さくすると、電子一個による帯電効果が重要になり、クーロン・ブロッケイド現象によって電子を一つ一つ制御するような、従来のものとは全く動作原理の異なる素子の実現できると期待されており、上記したように、トンネル接合のサイズを小さくした微小トンネル接合回路を用いた単電子トランジスタが既

に開発されている。

こうした微小トンネル接合回路に用いる金属としては、常伝導体、超伝導体、強磁性体などを用いることができる(非特許文献1ならびに非特許文献2参照)。

- [0003] ここで、図1には、微小トンネル接合によるクーロン・ブロッケイド現象の原理が示されており、第1の金属100と第2の金属102とによって絶縁体104を挟み込んで微小トンネル接合106を構成した場合に、

$$E_c \equiv e^2 / 2C \gg k_B T$$

$E_c$  : 帯電エネルギー

$e$  : 素電荷

$C$  : 微小トンネル接合の静電容量

$k_B$  : ボルツマン定数

$T$  : 絶対温度

であるならば、電子一個による帯電効果が重要になり、電子のトンネルが抑制されるクーロン・ブロッケイド現象が生じる。

ここで、微小トンネル接合106の接合面積が、 $0.1 \times 0.1 \mu\text{m}^2$ の微小トンネル接合であるならば、 $E_c$ は1Kオーダーとなる。

図2(a)には、上記したような微小トンネル接合により構成された微小トンネル接合回路を備えた単電子トランジスタの原理構成図が示されており、図2(b)には図2(a)の等価回路が示されている。

図2(a)を参照しながら説明すると、この単電子トランジスタは、第1の金属200と第2の金属202とによって絶縁体204を挟み込んで第1の微小トンネル接合206を構成するとともに、第2の金属202と第3の金属208とによって絶縁体210を挟み込んで第2の微小トンネル接合212を構成している。また、第1の金属200にプラスのバイアス電圧Vを印加する第1の電圧源214と、第3の金属208にマイナスのバイアス電圧Vを印加する第2の電圧源216とを備えている。

さらに、第2の金属202に隣接して、第2の金属202との間で平行平板コンデンサ218を構成するようにゲート電極220が配設されている。また、ゲート電極220にゲート電圧V<sub>g</sub>を印加する第3の電圧源222が配設されている。

次に、図2(b)を参照しながら上記した単電子トランジスタの等価回路を説明すると、この単電子トランジスタは、第1の微小トンネル接合206と、第2の微小トンネル接合212と、第2の金属202と、ゲート電極220と、平行平板コンデンサ218と、第1の電圧源214と、第2の電圧源216と、第3の電圧源222とを有して構成されている。

以上の構成において、はじめに、第1の微小トンネル接合206と第2の微小トンネル接合212との両方でクーロン・ブロッケイドが作用するように、第1の電圧源214、第2の電圧源216ならびに第3の電圧源222によってバイアス電圧Vとゲート電圧V<sub>g</sub>とを設定しておく。従って、こうした状態においては、この単電子トランジスタには電流Iは流れない。

次に、ゲート電圧V<sub>g</sub>を増加させていくと、はじめに第2の微小トンネル接合212のクーロン・ブロッケイドが解除されて電子が第2の金属202へトンネルする。これと同時に、第1の微小トンネル接合206のクーロン・ブロッケイドが解除されて、この単電子ト

ランジスタに電流Iが流れる。

即ち、この二重の微小トンネル接合(第1の微小トンネル接合206および第2の微小トンネル接合212)とゲート電極220とを有して構成されている単電子トランジスタにおいては、

$$E_c = e^2 / 2(C_1 + C_2 + C_g)$$

$E_c$ : 帯電エネルギー

$e$ : 素電荷

$C_1$ : 第1の微小トンネル接合206の静電容量

$C_2$ : 第2の微小トンネル接合212の静電容量

$C_g$ : 平行平板コンデンサ218の静電容量

と定義する。

ここで、バイアス電圧Vを一定に保つとともにゲート電圧 $V_g$ を変化させると、単電子トランジスタに流れる電流Iは周期的に変動する。

この変動の周期は、

$$C_g V_g = e$$

であり、また、低温、即ち、「 $k_B T / E_c$ 」( $k_B$ : ボルツマン定数,  $T$ : 絶対温度,  $E_c$ : 帯電エネルギー)が小さいほど変動が幅が大きくなる。

[0004] 従来、上記したような単電子トランジスタを構成するような微小トンネル接合回路を製造するに際しては、一般には電子線リソグラフィーと斜め蒸着法とを組み合わせた手法を用いていた(特許文献1、非特許文献3ならびに非特許文献4参照)。

[0005] ここで、電子線リソグラフィーと斜め蒸着法とを組み合わせた手法について説明すると、この手法は、図3に示すように、基板300上で中空に懸架されたマスク304を用いて、このマスク304に形成されたパターンの開口部304aに斜めの異なる2方向から蒸着を行うようにするものである。

より詳細には、この手法では、基板300上にスペーサー302を介して、パターンの開口部304aを形成されたマスク304を配置する。これにより、スペーサー302により基板300上に持ち上げられて、部分的に中空に浮いたマスク304が準備されることになる。

次に、マスク304の開口部304aを通して、ある角度を持った斜めの方向から第1の金属膜の蒸着306を行った後に、第1の金属膜表面を酸化して第1の金属膜上に酸化膜バリアを形成する。さらに、マスク304の開口部304aを通して第1の金属膜の蒸着306とは異なる角度を持った斜めの方向より第2の金属膜の蒸着308を行う。この第2の金属膜の蒸着308は、酸化膜バリアを介して第1の金属膜と2ヵ所において部分的に重複するように行う。

上記のように、斜めの異なる2方向から同じマスク304の開口部304aを用いて第1の金属膜の蒸着306と第2の金属膜の蒸着308とを順次に行い、これら2度の蒸着工程の間に金属膜の酸化を行って第1の金属膜上に酸化膜バリアを形成することにより、第1の金属膜と第2の金属膜とが重複する2ヵ所に微小トンネル接合が形成される。

[0006] しかしながら、上記した電子線リソグラフィーと斜め蒸着法とを組み合わせた手法を用いた微小トンネル接合回路の作製方法においては、作製することのできる回路パターンに制限があるとともに、使用することのできる金属材料に制限があるという問題点があった。

即ち、電子線リソグラフィーと斜め蒸着法とを組み合わせた手法を用いた微小トンネル接合回路の作製方法によっては、微細かつ複雑な回路パターンを作製することは困難であるという問題点があった。

また、斜め蒸着法において蒸着する金属がアルミニウム(Al)である場合には、アルミニウムが比較的軽い金属であるため問題ないが、斜め蒸着法において蒸着する金属としてアルミニウムよりも重い金属を用いる場合には、蒸着中にマスクの中空に浮いた部分が、蒸着された金属の重さでつぶれてしまうことがあった。

さらに、ニオブ(Nb)などについては、蒸着中の不純物(例えば、マスクから出てくる。)による、品質劣化が著しいという問題点があった。

なお、アルミニウムの超伝導転移温度( $T_c$ )は1.2Kであるが、ニオブの超伝導転移温度( $T_c$ )は9.2Kであるので、微小トンネル接合回路を構成する金属としてニオブを用いることへの強い要求がある。

非特許文献1: D. V. Averin and K. K. Likharev, in "Mesoscopic Phenomena in Mesoscopic Systems", ed. by L. P. Koussner, Plenum Press, New York, 1991, pp. 1-10.

mena in Solids,” edited by B. L. Altshuler, P. A. Lee, and R. A. Webb (Elsevier Science B. V., Amsterdam, 1991), Chap. 6.

非特許文献2:G. -L. Ingold and Y. V. Nazarov, in “Single Charge Tunneling,” edited by H. Grabert and M. H. Devoret (Plenum Press, New York, 1992), Chap. 2.

非特許文献3:N. Kim et al., “Fabrication of mesoscopic superconducting Nb wires using conventional electron-beam lithographic techniques,” J. Vac. Sci. Technol. B 20, 386-388(2002).

非特許文献4:P. Dubos et al., “Thermostable trilayer resist for niobium lift-off,” J. Vac. Sci. Technol. B 18, 122-126(2000).

特許文献1:特開平10-107340号公報

発明の開示

発明が解決しようとする課題

[0007] 本発明は、上記したような発明の背景ならびに従来の技術の有する問題点に鑑みてなされたものであり、その目的とするところは、作製する回路パターンの制限を大幅に緩和することができるようにした微小トンネル接合回路の作製方法および微小トンネル接合回路を提供しようとするものである。

また、本発明の目的とするところは、使用する金属材料の制限を大幅に緩和することができるようにした微小トンネル接合回路の作製方法および微小トンネル接合回路を提供しようとするものである。

課題を解決するための手段

[0008] 上記目的を達成するために、本発明は、基板上に第1の金属と絶縁体と第2の金属とを順次に積層した3層構造体を形成し、集束イオンビームを用いて上記3層構造体を深さ方向に切削加工して幅の狭い壁部を形成し、集束イオンビームを用いて、上記壁部に幅方向に貫通する穴を少なくとも1つ以上穿設するとともに、上記壁部の上面を深さ方向に切削加工して上記穴に隣接して位置する凹所を少なくとも1つ以上形成し、上記穴は第2の金属に入り込んだ位置から上記基板へ入り込んだ位置へ至る貫通孔であり、上記凹所は上記壁部の上面から第1の金属に入り込むように形成さ

れたものである。

従って、本発明によれば、上記穴と上記凹所との間に微小トンネル接合を形成することができる。

- [0009] また、本発明は、基板上に第1の金属と絶縁体と第2の金属とを順次に積層した3層構造体を形成し、集束イオンビームを用いて上記3層構造体を深さ方向に切削加工して幅の狭い壁部を形成し、集束イオンビームを用いて、上記壁部に幅方向に貫通する穴を穿設するとともに、上記壁部の上面を深さ方向に切削加工して上記穴を挟むように隣接して位置する2箇所の凹所を形成し、上記穴は第2の金属に入り込んだ位置から上記基板へ入り込んだ位置へ至る貫通孔であり、上記2箇所の凹所は上記壁部の上面から第1の金属に入り込むように形成されたものである。

従って、本発明によれば、上記穴と上記2箇所の凹所との間にそれぞれ微小トンネル接合を形成することができる。

- [0010] また、本発明は、集束イオンビームを用いて上記3層構造体を深さ方向に切削加工して、上記壁に隣接するとともに上記穴および上記2箇所の凹所に対向する位置に突起物を形成するものである。

従って、本発明によれば、2箇所の微小トンネル接合に隣接して電極を形成することができる。

- [0011] また、本発明は、上記第1の金属および上記第2の金属としてニオブを用いるようにしたものである。

また、本発明は、上記集束イオンビームを用いた加工の際にフッ化キセノンガスを導入するようにしたものである。

- [0012] また、本発明は、基板上に第1の金属と絶縁体と第2の金属とを順次に積層した3層構造体よりなる幅の狭い壁部と、上記壁部に幅方向に貫通して穿設された少なくとも1つ以上の穴と、上記壁部の上面に上記穴に隣接して形成された少なくとも1つ以上の凹所とを有し、上記穴は第2の金属に入り込んだ位置から上記基板へ入り込んだ位置へ至る貫通孔であり、上記凹所は上記壁部の上面から第1の金属に入り込むように形成されているものである。

従って、本発明によれば、上記穴と上記凹所との間に微小トンネル接合を形成した



微小トンネル接合回路を得ることができる。

- [0013] また、本発明は、基板上に第1の金属と絶縁体と第2の金属とを順次に積層した3層構造体よりなる幅の狭い壁部と、上記壁部に幅方向に貫通して穿設された穴と、上記壁部の上面に上記穴を挟むように隣接して形成された2箇所の凹所とを有し、上記穴は第2の金属に入り込んだ位置から上記基板へ入り込んだ位置へ至る貫通孔であり、上記2箇所の凹所は上記壁部の上面から第1の金属に入り込むように形成されているようにしたものである。

従って、本発明によれば、上記穴と上記2箇所の凹所との間にそれぞれ微小トンネル接合を形成した微小トンネル接合回路を得ることができる。

- [0014] また、本発明は、さらに、上記3層構造体よりなり、上記壁に隣接するとともに上記穴および上記2箇所の凹所に対向する位置に配置された突起物を有するようにしたものである。

従って、本発明によれば、2箇所の微小トンネル接合に隣接して電極を形成することができる。

- [0015] また、本発明は、上記第1の金属および上記第2の金属としてニオブを用いるようにしたものである。

#### 発明の効果

- [0016] 本発明は、以上説明したように構成されているので、作製する回路パターンの制限を大幅に緩和することができるようにした微小トンネル接合回路の作製方法および微小トンネル接合回路を提供することができるという優れた効果を奏する。

また、本発明は、以上説明したように構成されているので、使用する金属材料の制限を大幅に緩和することができるようにした微小トンネル接合回路の作製方法および微小トンネル接合回路を提供することができるという優れた効果を奏する。

#### 図面の簡単な説明

- [0017] [図1]図1は、微小トンネル接合によるクーロン・ブロッケイド現象の原理の説明図である。

[図2]図2(a)は微小トンネル接合により構成された微小トンネル接合回路を備えた単電子トランジスタの原理構成図であり、図2(b)は図2(a)の等価回路である。

[図3]図3は、電子線リソグラフィと斜め蒸着法とを組み合わせた微小トンネル接合の作製の手法の説明図である。

[図4]図4は、本発明による微小トンネル接合回路の作製方法の説明図であり、図4(a)は基板の構成を示し、図4(b)は基板上に形成された3層構造体の構成を示し、図4(c)は図5(c)に示す立体構造を図4(b)のA方向から見た場合の概略図である。

[図5]図5(a)ならびに図5(b)は図4(b)のA方向から立体構造の電子顕微鏡で観察した状態を示す説明図であり、図5(c)は立体構造の上方斜視における電子顕微鏡で観察した状態を示す説明図である。図5(a)は「1. カーボン保護膜を堆積させた後、荒削りする。」状態に対応するものであり、図5(b)は「2. 壁部を薄くする。」状態に対応するものであり、図5(c)は「3. 壁部に穴をあけ、凹部を形成する。」状態に対応するものである。

[図6]図6(a)は図5(c)における壁部と突起部とを拡大して示した電子顕微鏡で観察した状態を示す説明図であり、図6(b)は壁部と突起部とより構成される微小トンネル接合回路の等価回路である。

[図7]図7(a)は壁部と突起部とより構成される微小トンネル接合回路により構成した単電子トランジスタの概念構成説明図であり、図7(b)は図7(a)の等価回路である。

[図8]図8は、本発明により作製された単電子トランジスタの電流電圧特性の測定結果を示すグラフである。

[図9]図9は、本発明により作製された単電子トランジスタにおいて、バイアス電圧を固定してゲート電圧を変化させたときにおけるゲート変調の測定結果を示すグラフである。

[図10]図10は、本発明により作製された単電子トランジスタの温度依存性を示すための電流電圧特性の測定結果を示すグラフである。

[図11]図11は、本発明により作製された単電子トランジスタについて、図11(a)は9.02Kのときの微分抵抗( $dV/dI$ )の変化を示すグラフであり、図11(b)は9.18Kのときの微分抵抗( $dV/dI$ )の変化を示すグラフである。

[図12]図12は、本発明により作製された単電子トランジスタの低温電気伝導測定の測定結果を示すグラフである。

[図13]図13は、ニオブ／アルミニウム／ニオブの3層構造体を試料として用い、試料の一部である「 $5\mu\text{m}\times 5\mu\text{m}$ 」の領域に対して、イオン電流値9pAの集束イオンビームを5分間照射して切削加工を行った実験の実験結果を示す顕微鏡で観察した状態を示す説明図であり、試料を60度傾けて撮影したものである。左図(ガスなし)は、イオン電流値9pAの集束イオンビームの5分間照射の際にフッ化キセノンガスを導入しない場合である。右図(ガスあり)は、イオン電流値9pAの集束イオンビームの5分間照射の際にフッ化キセノンガスを導入した場合である。

#### 符号の説明

- [0018]
- |     |                    |
|-----|--------------------|
| 10  | 基板                 |
| 12  | シリコン(Si) 基板        |
| 14  | SiO <sub>2</sub> 膜 |
| 16  | ニオブ層               |
| 18  | アルミニウム酸化物層         |
| 20  | ニオブ層               |
| 22  | 3層構造体              |
| 50  | カーボン保護膜            |
| 70  | 壁部                 |
| 70a | 上面                 |
| 72  | 突起部                |
| 72a | 上面                 |
| 80  | 穴                  |
| 82  | 凹所                 |
| 84  | 凹所                 |
| 90  | 第1微小トンネル接合         |
| 92  | 第2微小トンネル接合         |

#### 発明を実施するための最良の形態

- [0019] 以下、添付の図面を参照しながら、本発明による微小トンネル接合回路の作製方法および微小トンネル接合回路の実施の形態の一例を詳細に説明するものとする。

なお、本明細書における説明ならびに添付の図面において、それぞれ同一あるいは相当する構成や内容については、それぞれ同一の符号を用いて示すことにより、その構成ならびに作用に関する重複する説明は省略する。

[0020] また、以下に説明する実施の形態においては、金属としてニオブを用いたニオブ系のジョセフソン素子(非常に薄い絶縁膜(厚さがナノメートルオーダーである。))を2枚の超伝導体薄膜でサンドイッチにした構造の素子をジョセフソン素子という。)よりなる単電子トランジスタを作製する場合について説明する。作製されたニオブ系の単電子トランジスタにおいては、後述するように、単電子トランジスタとして正しく動作すること、そして、ニオブが劣化していないことが確認された。

[0021] 以下、本発明による微小トンネル接合回路の作製方法により、金属としてニオブを用いたニオブ系のジョセフソン素子よりなる単電子トランジスタを作製する場合について具体的に説明する。

[0022] まず、はじめに、厚さ $t_1$ が $650\text{ }\mu\text{m}$ のシリコン(Si)基板12上に、酸化膜として厚さ $t_2$ が $0.3\text{ }\mu\text{m}$ の $\text{SiO}_2$ 膜14を形成した基板10を準備する(図4(a)参照)。

次に、スパッタリングの手法を用いて、基板10の $\text{SiO}_2$ 膜14上に厚さ $t_3$ が $0.3\text{ }\mu\text{m}$ のニオブ層16を形成し、ニオブ層16の上に厚さ $t_4$ が $0.01\text{ }\mu\text{m}$ のアルミニウム酸化物層18を形成し、アルミニウム酸化物層18の上に厚さ $t_5$ が $0.3\text{ }\mu\text{m}$ のニオブ層20を形成する(図4(b)参照)。なお、アルミニウム酸化物層18については、厚さが $0.001\text{ }\mu\text{m}$ の $\text{Al}_2\text{O}_3$ 層を含むアルミニウムにより構成されている。

これにより、基板10の $\text{SiO}_2$ 膜14上に、[厚さ $0.3\text{ }\mu\text{m}$ のニオブ層16/厚さ $0.01\text{ }\mu\text{m}$ のアルミニウム酸化物層18(厚さ $0.001\text{ }\mu\text{m}$ の $\text{Al}_2\text{O}_3$ を含む。)/厚さ $0.3\text{ }\mu\text{m}$ のニオブ層20]の3層構造体22が形成されることになる。

なお、ニオブ層16とニオブ層20とは微小トンネル接合における金属として機能し、アルミニウム酸化物層18は微小トンネル接合における絶縁体として機能する。

[0023] 次に、フォトリソグラフィとArイオン・ミリングとの手法を用いて、 $10\text{ }\mu\text{m}$ スケールで3層構造体22に対して矢印A方向(深さ方向)に切削加工を行う。即ち、フォトリソグラフィとArイオン・ミリングとの手法により基板10に形成された3層構造体22をシリコン基板10に到達するまで切削加工して、 $10\text{ }\mu\text{m}$ スケールで大まかな立体構造を形

成する。

次に、公知の集束イオンビーム装置(FIB:Focused Ion Beam)を用いて、集束イオンビーム装置から出射された集束イオンビームを $10\mu\text{m}$ スケールで大まかに形成された立体構造に照射して、集束イオンビームにより $10\mu\text{m}$ スケールで大まかに形成された立体構造を $0.1\mu\text{m}$ スケールで精密に切削加工する。

ここで、上記したフォトリソグラフィーとArイオン・ミリングとの手法や集束イオンビームの照射により3層構造体22に対して切削加工を行って形成する立体構造とは、壁部70と突起部72とを備えた図5(c)に示す立体構造である。また、図4(c)には、図5(c)に示す立体構造をA方向から見た場合の概略図が示されている。

なお、この実施の形態において用いた集束イオンビーム装置は、ガリウムイオン源からイオンビームを取り出して5〜10nmに集束させた上で、集束させたイオンビーム、即ち、集束イオンビームを試料(この実施の形態においては、3層構造体22を形成された基板10である。)に照射することのできる装置である。イオンビームと試料の相互作用によって、「観る機能」と「削る機能」と「付ける機能」との三種類の機能が実現される。

上記した実施の形態においては、上記機能のうち「削る機能」を利用している。この「削る機能」について説明すると、「観る機能」として用いるときよりもイオンビームのエネルギーを増やして試料に照射し、試料に照射されるイオンビームの照射位置を走査することによって、イオンビームにより試料を自由に削ることが可能となる。試料の加工したい部分にだけイオンビームを走査させることで、マスクを使わずに自由な形状の加工が可能となる。そして、「観る機能」と併用することによって、観察しながら好きな部分を削るといった作業が可能となる。

なお、「観る機能」について説明すると、ガリウムイオンビームを試料に照射すると、試料が励起されて二次電子が放出されることになり、イオンビームを試料上で走査させながら発生する二次電子を捉えることによって、試料の表面状態を観察することができるものである。

[0024] ここで、図5(a)(b)(c)および図6(a)に示す電子顕微鏡で観察した状態を示す説明図ならびに図7(a)に示す立体構造の概念図を参照しながら、 $10\mu\text{m}$ スケールで

大まかに形成された立体構造を、集束イオンビームにより $0.1\mu\text{m}$ スケールで切削加工する処理の詳細について説明する。なお、図5(a)ならびに図5(b)は、図4(c)と同様に図5(c)に示す立体構造をA方向から見た場合の電子顕微鏡で観察した状態を示す説明図であり、また、図5(c)は立体構造の上方斜視における電子顕微鏡で観察した状態を示す説明図であり、また、図6(a)は図5(c)における壁部70と突起部72とを拡大して示した電子顕微鏡で観察した状態を示す説明図であり(図6(b)は壁部70と突起部72とより構成される微小トンネル接合回路の等価回路である。)、また、図7(a)は壁部70と突起部72とより構成される微小トンネル接合回路により構成した単電子トランジスタの概念構成説明図である(図7(b)は図7(a)の等価回路である。 )。

まず、切削加工する際における壁部70の上面70aや突起部72の上面72aの損傷を防止するために、立体構造の壁部70や突起部72が形成される3層構造体22の上面の領域B(図4(c)参照)にカーボン保護膜50を堆積させ、その後に荒削りを行う(図5(a)参照)。この荒削りによりシリコン基板12に到達するまで切削加工して、壁部70を形成するとともに、壁部70に隣接して突起部72を形成する。なお、この荒削りの際における集束イオンビームのイオン電流値は、例えば、 $1.3\text{nA}$ である。

次に、壁部70の幅 $t_6$ を狭くするように切削加工を行い、壁部70の幅 $t_6$ を $0.1\mu\text{m}$ スケールの薄さとする(図5(b)参照)。なお、この切削加工の際における集束イオンビームのイオン電流値は、例えば、 $9\text{pA}$ である。

次に、壁部70に対して、幅 $t_6$ 方向に貫通する穴80を穿設するとともに、壁部70の上面70aを矢印A方向に切削加工して2箇所の凹所82, 84を形成する(図5(c)、図6(a)ならびに図7(a)参照)。なお、この切削加工の際における集束イオンビームのイオン電流値は、例えば、 $9\text{pA}$ である。

具体的には、穴80ならびに凹所82, 84は突起部72と対向する位置に形成されており、穴80はニオブ層20に入り込んだ位置から $\text{SiO}_2$ 膜14へ入り込んだ位置に至る貫通孔である。また、凹所82, 84は穴80を挟むようにして穴80に隣接して位置しており、いずれの凹所82, 84も、壁部70の上面70aからニオブ層16に入り込むように形成されている。

ここで、穴80と凹所82との間においては、金属であるニオブ層16とニオブ層20とによって絶縁体であるアルミ酸化物層18を挟み込んだ第1微小トンネル接合90が形成されており、穴80と凹所84との間においては、金属であるニオブ層16とニオブ層20とによって絶縁体であるアルミ酸化物層18を挟み込んだ第2微小トンネル接合92が形成されていて、ジョセフソン素子が構成されている。図6(b)には、上記した第1微小トンネル接合90と第2微小トンネル接合92との等価回路が示されている。

従って、例えば、図7(a)に示すように、壁部70の凹所82側の端部に対してニオブ層16にプラスのバイアス電圧Vを印加する第1の電圧源214を接続し、また、壁部70の凹所84側の端部に対してニオブ層16にマイナスのバイアス電圧Vを印加する第2の電圧源216を接続し、また、突起部72に対してニオブ層16にゲート電圧Vを印加する第3の電圧源222を接続することにより、図7(b)の等価回路に示す単電子トランジスタを構成できる。なお、壁70に対して間隙を開けて形成される突起部72は、ゲート電極として機能することになり、壁70と突起部72とにより平行平板コンデンサ218が構成されることになる。

[0025] なお、上記したフォトリソグラフィとArイオン・ミリングとの手法や集束イオンビームの照射により3層構造体22に対して切削加工を行って壁70や突起物72を形成したり、壁70に穴80や凹所82、84を形成する際に出る切削カスが、ジョセフソン結合たる第1微小トンネル接合90と第2微小トンネル接合92とを短絡する恐れがある。

このため、この実施の形態においては、微小トンネル接合たるジョセフソン接合を短絡する可能性がある上記した切削カスを陽極酸化して絶縁体とし、当該切削カスが電気伝導へ寄与することがないようにしている。なお、切削カスの陽極酸化には、従来より公知の技術を適用することができる。

[0026] 次に、図7(a)に示すようにして形成された単電子トランジスタを用いて行った測定結果について説明する。

作製された単電子トランジスタの電流電圧特性を測定したところ(図8参照)、超伝導ギャップ(中央の平らな部分)が見られ、その幅はニオブの微小トンネル接合2つ分に対応する。従って、作製された単電子トランジスタには、第1微小トンネル接合90と第2微小トンネル接合92との二重超伝導トンネル接合ができていることがわかる。

また、バイアス電圧を固定してゲート電圧を変化させたときに、電流が周期的に変動する(図9参照)。従って、作製された単電子トランジスタにおいては、ゲートが機能していることがわかる。

これらのことより、金属としてニオブを用いた単電子トランジスタができていることが確認された。

なお、上記の測定には、簡易的な冷凍機を用いた。簡易的な冷凍機の最低温度(3.2K)では、 $k_B T$ と $E_C$ は同程度である。そのため観測されたゲート変調の変調幅が小さいものとなっている。

[0027] ここで、劣化したニオブの超伝導転移温度( $T_C$ )や超伝導ギャップは、バルクのニオブの値よりも小さくなることが知られている。このような劣化は、電子線リソグラフィと斜め蒸着法とを組み合わせた手法を用いて作製されたニオブ膜について報告されている。

そこで、作製された単電子トランジスタの温度依存性を調べることにより、作製された単電子トランジスタの品質を評価する(図10参照)。

即ち、最低温度での超伝導ギャップは、微小トンネル接合1個につき3mV弱である。この値は、フォトリソグラフィで作製された高品質な微小トンネル接合の値と同程度である。

また、微分抵抗( $dV/dI$ )を吟味することにより得られた超伝導転移温度( $T_C$ )は $9.1 \pm 0.2$ Kである(図11(a)(b)参照)。これは誤差の範囲内で、バルクの超伝導転移温度( $T_C$ )の値である9.2Kと一致する。

これらのことより、作製された単電子トランジスタにおいては、作製の途中での劣化がない高品質なニオブが得られていることがわかる。

[0028] ところで、微分抵抗( $dV/dI$ )に関する解析の詳細は、次の通りである。即ち、図11(a)(b)は、9.02K(図11(a))と9.18K(図11(b))での微分抵抗-電圧のグラフである。二つの図に質的違いがあることは明らかであるので、9.02Kと9.18Kの間に超伝導転移温度( $T_C$ )があると考え、さらに温度計の誤差を考慮すると、

$$T_C = 9.1 \pm 0.2 \text{ K}$$

と結論することができる。



[0029] さらに、図12は、超伝導転移温度( $T_c$ )を境に低温側ではサブギャップ抵抗、高温側ではゼロバイアス抵抗を温度の関数としてプロットしたものである。図10(a)(b)を参照しての超伝導転移温度( $T_c$ )の決定が、理にかなったものであることが裏付けられている。なお、ここで、サブギャップ抵抗は、 $V/I$ の最大値として定義した。なお、ゼロバイアス抵抗は、 $V=0$ での微分抵抗と考えればよい。

[0030] なお、上記した実施の形態は、以下の(1)乃至(6)に説明するように適宜に変形してもよい。

(1) 上記した実施の形態においては、穴80を挟むようにして2箇所の凹所82, 84を形成したが、凹所は2箇所に限られものではなく、凹所82または凹所84のいずれか1箇所のみ形成するようにしてもよい。なお、凹所82のみを形成した場合には、例えば、第1の電圧源214はニオブ層16に接続するとともに第2の電圧源216はニオブ層20に接続すればよく、一方、凹所84のみを形成した場合には、例えば、第1の電圧源214はニオブ層20に接続するとともに第2の電圧源216はニオブ層16に接続すればよい。

要するに、壁部70に穴80のように形成した穴に隣接して、凹所82や凹所84のような凹所を形成することにより、穴と凹所との間に微小トンネル接合が形成されることになるので、本発明においては、穴や凹所の数は特に限定されるものではない。例えば、壁に複数の穴を形成する場合には、それぞれの穴に対して当該穴に隣接して凹所を1つ形成したり、あるいは、それぞれの穴に対して当該穴を挟んで隣接して凹所を2つ形成することができる。なお、3層構造体22に各電圧源を接続する際には、その接続する層は適宜変更すればよい。

(2) 上記した実施の形態においては、微小トランジスタ接合における金属としてニオブを用いたが、これに限られるものではないことは勿論であり、アルミニウムなどの他の金属を用いるようにしてよいことは勿論である。

(3) 上記した実施の形態においては、微小トランジスタ接合における絶縁体としてアルミニウム酸化物を用いたが、これに限られるものではないことは勿論であり、他の金属酸化物などを用いるようにしてよいことは勿論である。

(4) 上記した実施の形態においては、微小トランジスタ接合回路の一例として単電

子トランジスタについて説明したが、これに限られるものではないことは勿論であり、種々の微小トンネル接合回路を作製することができる。

(5) 上記した実施の形態においては、フォトリソグラフィーとArイオン・ミリングとの手法や集束イオンビームの照射により3層構造体22に対して切削加工を行って壁70や突起物72を形成したり、壁70に穴80や凹所82、84を形成する際に出る切削カスを陽極酸化して絶縁体とすることにより、当該切削カスによる微小トンネル接合たるジョセフソン接合の短絡の可能性を排除するようにしたが、集束イオンビームの照射による切削加工を行っている際にフッ化キセノン ( $\text{XeF}_2$ ) ガスを導入するようにした場合には、陽極酸化により絶縁体としなければならないニオブの厚さを小さくすることができるようになり、その結果、微小トンネル接合の精度を向上することができるようになる。

なお、集束イオンビームの照射による切削加工を行っている際におけるフッ化キセノンガスを導入は、例えば、切削カスを陽極酸化する工程の直前などに行うようにすることができる。

以下に説明する本願発明者の実験結果から明らかなように、フッ化キセノンガスを導入しながら集束イオンビームの照射による切削加工を行うと、ニオブ (Nb) の加工速度が著しく速くなる (具体的には、フッ化キセノンガスを導入しない場合の100倍またはそれ以上の速さとなる。) のに対して、アルミニウム (Al) の加工速度はほとんど変わらない。この理由は、フッ化キセノンガスがニオブと化学的に反応し、ニオブを取り除いたためと考えられる。

従って、上記したように切削カスを陽極酸化する前に、微小トンネル接合の近傍をフッ化キセノンガスを導入しながら、非常に弱い集束イオンビームの照射により僅かに切削加工することにより、微小トンネル接合を短絡する切削カスの大部分を取り除くことが可能となる。

このことによって、陽極酸化により絶縁体としなければならないニオブの厚さを小さくすることができるようになり、その結果、微小トンネル接合の精度を向上することができるようになる。

なお、本願発明者の実験は、以下の通りである。即ち、上記した実施の形態におい

て用いたニオブ／アルミニウム／ニオブの3層構造体22と同様な3層構造体を用意し、その一部である「 $5\mu\text{m} \times 5\mu\text{m}$ 」の領域に対して、イオン電流値9pAの集束イオンビームを5分間照射して切削加工を行った。なお、イオン電流値9pAの集束イオンビームの5分間照射は、フッ化キセノンガスを導入しない場合とフッ化キセノンガスを導入した場合との2つの場合について行った。

まず、フッ化キセノンガスを導入しない場合について説明すると、イオン電流値9pAという電流値は非常に弱いため、集束イオンビームを照射された3層構造体の表面、即ち、ニオブの層にはほとんど変化がなかった(図13の左図(ガスなし)参照。)

一方、フッ化キセノンガスを導入しながら切削加工を行った場合には、3層構造体の表面のニオブの層が完全に除去されて、アルミニウムの層が表面に出ていた(図13の右図(ガスあり)参照。)。アルミニウムの層はニオブの層に比べて非常に薄い、アルミニウムの層にはほとんど変化が見られない。

このことから、集束イオンビームの照射の際にフッ化キセノンガスを導入すると、ニオブの切削速度は著しく大きくなるが、その一方で、アルミニウムはほとんど変化しないことが判る。

(6) 上記した実施の形態ならびに上記(1)乃至(5)に示す変形例は、適宜に組み合わせるようにしてもよい。

#### 産業上の利用可能性

[0031] 本発明は、電荷測定や量子計算を実現する電子素子として知られている単電子トランジスタなど、種々の微小トンネル接合回路に利用することができる。

## 請求の範囲

- [1] 基板上に第1の金属と絶縁体と第2の金属とを順次に積層した3層構造体を形成し、
- 集束イオンビームを用いて前記3層構造体を深さ方向に切削加工して幅の狭い壁部を形成し、
- 集束イオンビームを用いて、前記壁部に幅方向に貫通する穴を少なくとも1つ以上穿設するとともに、前記壁部の上面を深さ方向に切削加工して前記穴に隣接して位置する凹所を少なくとも1つ以上形成し、
- 前記穴は第2の金属に入り込んだ位置から前記基板へ入り込んだ位置へ至る貫通孔であり、前記凹所は前記壁部の上面から第1の金属に入り込むように形成されたことを特徴とする微小トンネル接合回路の作製方法。
- [2] 基板上に第1の金属と絶縁体と第2の金属とを順次に積層した3層構造体を形成し、
- 集束イオンビームを用いて前記3層構造体を深さ方向に切削加工して幅の狭い壁部を形成し、
- 集束イオンビームを用いて、前記壁部に幅方向に貫通する穴を穿設するとともに、前記壁部の上面を深さ方向に切削加工して前記穴を挟むように隣接して位置する2箇所の凹所を形成し、
- 前記穴は第2の金属に入り込んだ位置から前記基板へ入り込んだ位置へ至る貫通孔であり、前記2箇所の凹所は前記壁部の上面から第1の金属に入り込むように形成されたことを特徴とする微小トンネル接合回路の作製方法。
- [3] 請求項2に記載の微小トンネル接合回路の作製方法において、
- 集束イオンビームを用いて前記3層構造体を深さ方向に切削加工して、前記壁に隣接するとともに前記穴および前記2箇所の凹所に対向する位置に突起物を形成する
- ことを特徴とする微小トンネル接合回路の作製方法。
- [4] 請求項1、請求項2または請求項3のいずれか1項に記載の微小トンネル接合回路

の作製方法において、

前記第1の金属および前記第2の金属はニオブである

ことを特徴とする微小トンネル接合回路の作製方法。

- [5] 請求項4に記載の微小トンネル接合回路の作製方法において、

前記集束イオンビームを用いた加工の際にフッ化キセノンガスを導入する

ことを特徴とする微小トンネル接合回路の作製方法。

- [6] 基板上に第1の金属と絶縁体と第2の金属とを順次に積層した3層構造体よりなる幅の狭い壁部と、

前記壁部に幅方向に貫通して穿設された少なくとも1つ以上の穴と、

前記壁部の上面に前記穴に隣接して形成された少なくとも1つ以上の凹所と

を有し、

前記穴は第2の金属に入り込んだ位置から前記基板へ入り込んだ位置へ至る貫通孔であり、前記凹所は前記壁部の上面から第1の金属に入り込むように形成されている

ことを特徴とする微小トンネル接合回路。

- [7] 基板上に第1の金属と絶縁体と第2の金属とを順次に積層した3層構造体よりなる幅の狭い壁部と、

前記壁部に幅方向に貫通して穿設された穴と、

前記壁部の上面に前記穴を挟むように隣接して形成された2箇所の凹所と

を有し、

前記穴は第2の金属に入り込んだ位置から前記基板へ入り込んだ位置へ至る貫通孔であり、前記2箇所の凹所は前記壁部の上面から第1の金属に入り込むように形成されている

ことを特徴とする微小トンネル接合回路。

- [8] 請求項7に記載の微小トンネル接合回路において、さらに、

前記3層構造体よりなり、前記壁に隣接するとともに前記穴および前記2箇所の凹所に対向する位置に配置された突起物と

を有することを特徴とする微小トンネル接合回路。

- [9] 請求項6、請求項7または請求項8のいずれか1項に記載の微小トンネル接合回路において、
- 前記第1の金属および前記第2の金属はニオブである
- ことを特徴とする微小トンネル接合回路。

[図1]

